## 論文 弾性波の伝播速度に着目した PC グラウトの充填評価手法

国枝 泰祐\*1・鎌田 敏郎\*2・浅野 雅則\*3・六郷 惠哲\*4

要旨:本研究は,PCグラウトの充填評価に衝撃弾性波法を適用する場合において,弾 性波伝播速度を指標として用いる方法に関して検討を行ったものである.まず,供試体 実験により,グラウト充填度と弾性波伝播速度の関係を把握した.また,2次元FEM解 析により供試体内部での弾性波伝播挙動を視覚的に評価することによって,グラウト充 填度の違いにより弾性波伝播速度が変化する理由について考察を加えた.さらに,実物 大PC桁(桁長35m)においても実験を実施し,本手法の実構造物への適用性に関する検 討を行った.

キーワード:非破壊試験,衝撃弾性波法,伝播速度,PC構造物,PC グラウト,FEM 解析

1. はじめに

PC グラウトの充填不良は、鋼材の腐食を招き, さらに,鋼材破断やプレストレスの低下を引き 起こしかねない.したがって PC 構造物では, グラウトの充填状況を非破壊的に調査した上で, 適切な維持管理を行うことが極めて重要である.

PC グラウトの充填評価に用いる非破壊試験 法として,衝撃弾性波法を適用するための研究 <sup>1),2)</sup>が行われている.これらの方法は,いずれ も,PC 鋼材端部を打撃することによって部材の 長手方向に伝播させた弾性波を受振し,波形の 周波数分布特性に着目してグラウトの有無を判 別するものである.しかしながら,周波数分布 形状は,打撃の状況やセンサの特性などの影響 を受けて変化するという問題点を有する.また, 周波数分布を比較する場合は,定性的な判断に よることとなり,より一層の客観性の向上が望 まれる.

一方,受振波の卓越周波数に着目した方法と してインパクトエコー法<sup>3)</sup>がある.この方法で は,ピーク周波数の値により定量的(客観的) にグラウトの有無を判断できる可能性があるが, シース管のある限定した箇所のみを評価する手

法であるため,部材寸法が大きい場合,試験に 多大な時間を要する.

これらを受けて著者らは,特に,衝撃弾性波 法における評価指標に関する検討を行い,弾性 波伝播速度を用いることの可能性を見出してい る<sup>4)</sup>.そこで本研究では,この成果に基づき, まず,スラブ供試体での実験において,グラウ ト充填度と弾性波伝播速度の関係について検討 を行った.また,グラウト充填状況の違いが弾 性波伝播速度を変化させるメカニズムを明らか にするため,簡易的な2次元モデルにおいて FEM 解析を行った.さらに,本手法の実構造物 への適用性を検討するため,桁長35mの実物大 PC 桁による実験を実施した.

## 2. スラブ供試体実験

2.1 スラブ供試体

本実験では,写真 - 1 および図 - 1 に示す PC スラブ供試体を用いた.コンクリートおよびグ ラウトの水セメント比はそれぞれ 37%および 45%であり,シースにはコンジットシース 35, PC 鋼棒には B 種 1 号 23 を用いている.スラ ブ供試体内部は,グラウト充填度の違いが弾性

- \*1 岐阜大学大学院学生 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
- \*2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)
- \*3 岐阜大学大学院学生 工学研究科生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)
- \*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

波伝播速度に与える影響を検討するため,グラウト充填度を 0%,25%,50%,75%および 100%と変化させてある.

2.2 計測概要

弾性波の入力位置および受振位置を図 - 2 に 示す.弾性波の入力には,一定の衝撃を与える ことができるバネポインタを用いた.入力位置 は,グラウト充填側の PC 鋼棒端部の中央部分 とした.弾性波の受振には150kHz 共振型の AE センサを用い,伝播時間の計測にはディジタル AE 計測システムを用いた.弾性波伝播速度は, センサ間距離を伝播時間により除したものとし て求めた.センサの貼り付け位置は,PC 鋼棒両 端部の定着プレートとした.

2.3 保護コンクリート供試体

ここでは, さらに, 図 - 3に示すように, 2.1 で示したスラブ供試体のPC鋼材両端面の露出 部分を保護コンクリートで覆い,より実構造物 に近い状況での実験を加えた.なお,2.1で示し たスラブ供試体と区別するために,以後保護コ ンクリート打設後のスラブ供試体を,「保護コ ンクリート供試体」とする.弾性波の入力位置 および受振位置を図 - 4に示す.弾性波の入力位 置はPC鋼棒延長上の保護コンクリート部分と した.また, AEセンサの貼り付けを,弾性波入 力位置近傍および反対側のコンクリート側面の 中央部分とした.その他の計測条件は2.2と同様 にした.

2.4 結果および考察

図 - 5 にスラブ供試体および保護コンクリー ト供試体におけるグラウト充填度と伝播速度比 の関係を示す.ここで示した伝播速度比とは, スラブ供試体におけるグラウト充填度 0%の場 合の伝播速度に対する比率である.これによる と,保護コンクリートの有無にかかわらずグラ ウト充填度が高くなるに従って,伝播速度比が 徐々に小さくなっていく傾向が見られる.グラ ウト充填度が 0%の場合は入力された弾性波が PC 鋼棒のみを伝播するのに対して,グラウト充 填部分では鋼棒とグラウトが一体となった複合



写真 - 1 スラブ供試体全景



図 - 1 スラブ供試体







図-3 保護コンクリート供試体



部材中を伝播し,PC 鋼棒のみの場合と伝播挙動 が異なるものと考えられる.したがって,入力 された弾性波がグラウトと PC 鋼棒の複合部材 中をより長く伝播するほど,その影響が大きく 現れたためと考えられる.また,保護コンクリ ート供試体の伝播速度比は,スラブ供試体の伝 播速度比よりも小さくなっている.これは,ひ とつには,保護コンクリートの厚み(2×250mm) の分だけコンクリートのみを透過することが違 いとなって現れたものと考えられる.また,衝 撃の作用箇所の材質が異なる(鋼材とコンクリ ート)場合は,衝撃の継続時間にも違いが生じ, 入力波の周波数特性が変化したことによる可能 性も考えられるが,こちらは今後の検討課題で ある.

以上の結果より,スラブ供試体実験において,入力点 弾性波伝播速度の変化の傾向を把握することが できた.

3. 簡易モデルによる弾性波伝播挙動の把握

3.1 解析概要

ここでは、弾性波の伝播挙動を把握するため, -PC鋼材にグラウト、シースおよびコンクリート を挟んで重ね合わせた2次元の簡易モデル(図 -6参照)を作成し、この端部に衝撃荷重を与 えることにより生じる部材内部での応答変位の 分布を求めた.表-1に、解析に使用した主な 構成材料の特性を示す.本解析で用いた構成材 料は、すべて線形弾性体として扱った.

このモデルにおいては、グラウト充填度を0%, 50%(図-6の中央部分から左半分がグラウト 充填部分)および100%と変化させた.モデル に入力する衝撃荷重は、鋼材端部の中央に作用 する節点荷重として、図-7に示す波形を用い た.

## 3.2 結果および考察

解析により得られた供試体内部での弾性波伝 播挙動を,グラウト充填度が0,50%および100% の場合について,それぞれ図-8~10に示す.な お,図中の矢印は弾性波の先端部分を,右上の



図 - 5 グラウト充填度と伝播速度比の関係



図 - 6 2次元簡易モデル

表 - 1 解析条件

構成材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比	弾性係数 (GPa )
コンクリート	2.3	0.2	31.0
グラウト	1.8	0.2	23.3
鋼材	7.9	0.3	203.3



図 - 7 入力波形

数字は,打撃入力開始後の経過時間を示す.また,図における色の濃淡の違いは変位の大きさの程度を表している.

グラウト充填度が0%の場合(図-8),入力さ

れた弾性波は,鋼材部分を伝播する波と,プレ ートを介してコンクリート部に入力され,コン クリート部を伝播する波とがそれぞれ独立して 存在する様子が伺える.これに対し,グラウト 充填度が50%の場合(図-9),入力された弾性 波はグラウト充填部分(左半分)において鋼材 およびコンクリート部をほぼ一体となって伝播 している(0.2ms後)が,未充填部分(右半分) では,グラウトによる拘束の影響がなくなるた め鋼材部分を選択的に伝わる波が確認された (0.6ms後).一方,グラウト充填度100%の場合 (図-10),弾性波は,鋼材,グラウトおよびコ ンクリート中を一様に伝播しており,他のケー スでみられた各部材間での波頭の位置の違いは 見られない.

これにより, グラウトが存在することによっ て,モデル内部での弾性波伝播挙動の違いが視 覚的に明らかになった.また,弾性波の先端部 分に着目すると,グラウト充填度が大きいケー スほどグラウトの拘束による影響が大きくなる ため,同一経過時間での比較において,衝撃入 力位置から波頭までの伝播距離が短い.すなわ ち,伝播速度が遅くなる傾向がある.これは図 -5における実験結果の傾向と一致しており,解 析の面からも,弾性波伝播速度を用いることの 有効性が確認できた.

このモデルは2次元であることや、弾性波伝播 速度として縦波伝播速度のみが仮定されている ことなどから、実験対象および実現象とは異な る面があるものの、みかけの伝播速度に差異が 生じるメカニズムについてはある程度理解でき たものと考えられる.

4 実物大 PC 桁実験

## 4.1 実験概要

図 - 11 に供試体概要を示す.供試体は 1,500 ×1,950×35,000[mm]のT型断面であり,ケー ブルは C1 ~ C5 の計 5 本で,曲線状に配置され ている.写真 - 2 に,供試体の全景を示す.ま た,図 - 11 において,点線はグラウト未充填部



写真 - 2 PC 桁の全景

分を,実線はグラウト充填部分を示す.グラウ ト充填度の違いが弾性波伝播速度に及ぼす影響 を検討するため、充填度を完全充填、部分充填 (グラウト充填度 37%および 65%)および完全 未充填の3つの異なるパターンを用いた.弾性 波の入力には,スラブ供試体実験と同じ入力装 置を用いた.入力位置は,主桁端部の保護コン クリート中央部, PC 鋼材端部, 定着部近傍およ びウェブ部分のコンクリート表面とした (写真 -3参照). 受振装置にはディジタル AE 計測シ ステムを, AE センサには 150kHz 共振型センサ を用いた.センサの貼付けは,対象とするケー ブル (C1~C5) ごとに行い, いずれの場合も, 桁両端部(写真-3参照)にそれぞれ2ch,ウェ ブ部分のコンクリート表面(以下側面とする. 写真 - 4 参照) において各ケーブルの配置に沿 うように 4ch を設置した (図 - 12 参照).

4.2 結果および考察

グラウト充填度と弾性波伝播速度比の関係を, 保護コンクリート入力および PC 鋼材端部入力 のそれぞれについて図 - 13 に示す.なお,ここ での伝播速度は,桁の両端面に配置した受振セ ンサにより求めた全長平均伝播速度である.ま た,完全未充填(ケーブル番号:C3)の場合の 伝播速度に対する比として伝播速度比を定義し た.これによると,保護コンクリート中央部お よび PC 鋼材端部を打撃した場合,グラウト充 填度が高くなるに従って伝播速度比が徐々に小 さくなる傾向がみられた.この傾向は,スラブ 供試体での実験結果や2次元モデルでの解析結 果と一致している.

次に,受振センサを桁両端部近傍の側面にそ れぞれ配置した(図-12中の 印)場合の全長 平均伝播速度比を図-14に示す.この図より, 側面上で受振した場合でも,完全未充填と完全 充填との違いは明確であった.しかしながら, 側面で受振した場合の全長平均伝播速度では, 部分充填の判別は難しい可能性が考えられる.

図 - 15 に,桁端部および桁端部近傍の側面を 打撃した後側面において受振した場合の,図-



C1 C2 C3 C5 (0) (100) (0) (100)

図-15 区間別伝播速度比

ケーブル番号およびグラウト充填度

カッコ内の数字は充填度を示す

(入力:端部および側面,受振:側面)

(0)(100)(0)(100)

12 における [ 区間 1+区間 2 ] および [ 区間 4+ 区間 5 ] での伝播速度比の平均値(以下,「区間 別伝播速度比」とする)を示す.なお,これら の区間においては,C1 および C3 は完全未充填 部分(0%) C2 および C5 は完全充填部分(100%) とみなすことができる.

これによると,(a)の定着部近傍および(b) の側面を打撃した場合共に,C1およびC3の伝 播速度比の値がC2およびC5の伝播速度比の値 より大きくなる傾向を示した.これより,側面 受振の場合には,区間別伝播速度を用いること により,区間別に完全充填あるいは完全未充填 の判別を行うことが可能と考えられる.

(a) および(b) のいずれの伝播速度比にお いても, C3 と C2 および C5 との差は, C1 とそ れらとの差よりも小さくなっている.これは, 各ケーブルの間隔が供試体下端部になるにつれ て狭くなっている構造のため,近接するケーブ ルの影響を相互に受けている可能性が考えられ る.したがって,本手法によるグラウト充填評 価においては,ケーブル間隔の影響を考慮する 必要があると考えられる.

5.まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す.

- スラブ供試体での実験において,グラウト 充填度が大きくなるにつれて弾性波伝播速 度が小さくなる傾向が示された.また,保 護コンクリートがある場合においても,傾 向は同様であることがわかった.
- スラブ供試体をもとにした簡易的なモデル を用いて2次元FEM解析を行い,モデルにお ける弾性波伝播挙動を視覚的に把握するこ とができた.この結果においても,供試体 実験と同様の傾向が見られた.
- 3) 全長35mの実物大PC桁に本手法を適用し、 本研究で用いた打撃方法により35mの距離 においても弾性波を伝播させることが可能 であることを確認した.また、桁の両端部 で受振が可能であれば、一方の端部で弾性

波を入力することにより,全長平均伝播速度を用いてグラウト充填度を評価できる可能性が示された.また,桁側面部で受振を行う場合は,区間別伝播速度を用いることが有効であることがわかった.

謝辞:実験の実施にあたり,(株)安部工業所お よび(社)プレストレスト・コンクリート建設 業協会の協力を得たことをここに記して謝意を 表する.

参考文献

- 1) 黒野幸弘,山田和夫,中井裕司:衝撃弾性 波法を適用したPC床板のグラウト充填性評 価に関する基礎的研究,コンクリート工学 年次論文報告集,Vol.17,No.1,pp.1175-1180, 1995
- 2) 斎藤宏行,尼崎省二:衝撃弾性波法による PCグラウト充填評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21, No.2,pp.1267-1272,1999
- Barbara J. Jaeger , Mary J. Sansalone and Randall W. Poston : Detecting Voids Grouted Tendon Ducts of Post-Tensioned Concrete Structures Using the Impact- Echo Method , ACI Structural Journal , Vol.93 , No.4 , pp.462-473 , 1996
- 4) 北園英明,鎌田敏郎,横山博司,六郷恵哲:
  弾性波の伝播特性に基づいたPCグラウト充 填評価手法に関する基礎的研究,コンクリ ート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.367-372,2000